

Etude de l'hygroexpansion du carton plat par une méthode de corrélation d'images obtenues par MEB environnemental et microtomographie aux rayons X

Analysis of paperboard hygroexpansion by digital correlation of images obtained by ESEM and X-ray microtomography

J. Viguié¹, P.J.J. Dumont¹, S. Rolland du Roscoat², P. Vacher³, I. Desloges¹, E. Mauret¹, J. -F. Bloch¹

1 : Laboratoire de Génie des Procédés Papetiers (LGP2),
CNRS / Institut polytechnique de Grenoble (Grenoble INP)
BP 65 - 38402 SAINT-MARTIN-D'HERES cedex, France
e-mail : jeremie.viguié@grenoble-inp.fr, pierre.dumont@grenoble-inp.fr

2 : Laboratoire Sols-Solides-Structures-Risques (3S-R)
CNRS / Universités de Grenoble (UJF & Grenoble INP)
BP 53 - 38041 SAINT-MARTIN-D'HERES cedex 9, France

3 : Laboratoire SYMME, Polytech Savoie, Université de Savoie
Domaine Universitaire BP 80439 – 74944 ANNECY-LE-VIEUX, France

Résumé

Le carton plat est un matériau stratifié. Ses couches ont une structure anisotrope et sont formées par des fibres de bois issues de pâtes à papier de différents types. Au cours de sa transformation et de son utilisation, le carton plat est soumis à des variations d'humidité relative de l'air ambiant. Celles-ci peuvent occasionner des problèmes de stabilité dimensionnelle telles que des pertes de planéité du carton et une décohésion de ses couches. Ce phénomène est anisotrope. Assez bien décrit dans le plan, mais assez peu selon l'épaisseur du carton, il est ici étudié au moyen d'outils classiques donnant accès à des coefficients d'hygroexpansion macroscopiques selon les directions d'anisotropie du carton. Une analyse, plus fine, par méthode de corrélation d'images, obtenues par MEB environnemental ou microtomographie aux rayons X au cours desquels l'humidité relative a été contrôlée, a permis de déterminer les champs de déformation hygroscopiques au travers de l'épaisseur du carton. Ceux-ci présentent de fortes hétérogénéités qui peuvent être reliées à une évolution spécifique de la porosité de certaines couches. Par ailleurs, il est possible de distinguer un comportement différent des couches selon la nature de leurs fibres, fonction des caractéristiques des pâtes chimiques ou mécaniques dont elles proviennent.

Abstract

Folding board is a stratified material. Its layers have an anisotropic structure and are made up of wood fibers from different paper pulps. During converting and use, folding board is subjected to changes of the relative humidity of the ambient air. These can cause dimensional stability problems such as curling and loss of cohesion. This phenomenon is anisotropic. It is rather well described in the board plane, but less through its thickness. It is here studied thanks to standard instruments which provide macroscopic hygroexpansivities in the directions of anisotropy of folding board. A deeper analysis is performed thanks to an image correlation method. The analysed images are obtained by environmental scanning electron microscopy (ESEM) or X-ray microtomography under controlled relative humidity conditions. This provides the hygroexpansive strain fields through the board thickness. These fields reveal strong heterogeneities, which can be related to a specific evolution of the porosity of each layer. In addition, it is possible to distinguish a particular behaviour of the layers according to the nature of their fibers, which can be extracted from mechanical or chemical pulps.

Mots Clés : carton plat - hygroexpansion – corrélation d'images – MEB environnemental – Microtomographie aux rayons X

Keywords: Folding board – Hygroexpansion – Digital Image Correlation – ESEM – X-ray microtomography

1. Introduction

Le carton plat est un matériau d'emballage rigide dont l'utilisation est croissante pour des applications alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques. C'est un matériau stratifié : des pâtes à papier différentes sont utilisées pour former chacune de ses couches. Les pâtes à papier sont constituées de fibres de bois, extraites selon deux procédés : le procédé chimique et le procédé mécanique. Elles subissent aussi des traitements post-extraction comme le blanchiment ou le raffinage. Chacun de ces procédés et traitements confère des propriétés hygro-mécaniques spécifiques aux couches de carton produites avec ces pâtes. En raison de l'orientation des fibres et de l'opération de séchage se produisant au cours de sa fabrication, le carton est un matériau dont la structure est anisotrope. Dans le plan, on distingue ainsi le Sens Marche ou Sens Machine (SM) et le Sens Travers (ST) pour désigner les directions principales d'anisotropie.

Les variations d'Humidité Relative (HR) de l'air ambiant sont à l'origine de nombreux problèmes au cours de la transformation et de l'utilisation du carton plat. Elles peuvent modifier ses dimensions, affecter sa plianité et menacer son intégrité, en provoquant des phénomènes de séparation des couches.

Pour un papier impression-écriture, on constate typiquement que sa teneur massique en eau double, si on impose une variation de l'humidité relative de 20 à 80 %, et atteint des valeurs proches de 10%. Dans le même temps, on constate une déformation du papier. Dans son plan, selon le sens marche, le papier peut subir une déformation hygroscopique de l'ordre de 0.5% pour une variation de la teneur en eau de l'ordre de 5 points. Selon le sens travers, cette variation dimensionnelle est 3 à 5 fois plus élevée, tandis qu'elle est 10 fois supérieure selon son épaisseur [1].

Une délignification poussée de la pâte, la présence d'éléments fins et l'augmentation du degré de liaisons par le raffinage sont de nature à augmenter l'hygroexpansion. Néanmoins, le facteur qui a le plus d'influence reste le séchage. L'hygroexpansion d'un papier séché à retrait nul est 2 à 3 fois inférieure à celle d'un papier séché à retrait libre [2].

Pour mesurer l'hygroexpansion des papiers, des appareils ont été spécialement développés. Leur principe consiste généralement à encastrier les deux extrémités d'une bande de papier à l'intérieur d'une enceinte dans laquelle l'humidité relative peut être contrôlée. L'un des encastrements est fixe, l'autre, mobile, permet la mesure de la variation de longueur de l'échantillon. Ce type d'appareils permet une mesure macroscopique de l'hygroexpansion des papiers. Des mesures plus fines, limitées au plan du papier, ont aussi été menées grâce à une méthode d'analyse d'images [3].

Pour autant, à notre connaissance, aucune étude n'a porté jusqu'à présent sur une analyse tridimensionnelle de l'hygroexpansion du carton plat et des micro-mécanismes liés de déformation couche par couche. C'est l'objet de cette étude expérimentale.

Les méthodes classiques de mesure de l'hygroexpansion ont été utilisées pour évaluer l'hygroexpansion du carton plat dans le plan. En parallèle, une méthode d'analyse d'images issues d'essais réalisés dans un Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE) et d'essais de microtomographie aux rayons X avec contrôle *in situ* de l'humidité a permis l'évaluation de l'hygroexpansion moyenne dans l'épaisseur et une analyse plus fine à l'échelle des fibres.

2. Matériaux, équipements et méthode expérimentale

2.1. Carton plat

Les essais sont réalisés sur un carton plat de 450 g/m² et de 0.71 mm d'épaisseur, composé de 11 couches issues de pâtes vierges (non issues du recyclage). Du recto au verso, les couches du carton plat sont constituées de

- 2 couches pigmentaires constituées de carbonate de calcium, de kaolin et de latex (2 x 10 g/m²),
- 2 couches de pâte chimique blanchie et raffinée à 30 °SR (2 x 30 g/m²),
- 1 couche de pâte mécanique blanchie et raffinée à 50-60 °SR à laquelle des rebus de production sont ajoutés (jusqu'à 40% en masse) (60 g/m²),
- 3 couches de pâte mécanique écrue, raffinée à 50-60 °SR plus des rebus de production (jusqu'à 40% en masse) (3 x 60 g/m²),
- 1 couche de pâte mécanique blanchie et raffinée à 50-60 °SR plus des rebus de production (jusqu'à 40% en masse) (60 g/m²),
- 1 couche de pâte chimique blanchie et raffinée à 30 °SR (30 g/m²),
- 1 couche pigmentaire (10 g/m²).

2.2. Appareils de mesure

L'évolution de la teneur en eau de ces matériaux est mesurée à une température ambiante de 23°C pour les sauts d'humidité relative suivants: HR = 50-20-80-20-50 % (cf. Fig. 2a-b), grâce à l'appareil VARIMASS[®] développé au laboratoire LGP2. L'hygroexpansion est déterminée par l'appareil VARIDIM[®] pour les mêmes

variations d'humidité relative. Les systèmes VARIMASS[®] et VARIDIM[®] sont composés d'un générateur d'air humide, d'une enceinte accueillant les échantillons et d'un ordinateur qui permet le contrôle de l'ensemble du processus de mesure.

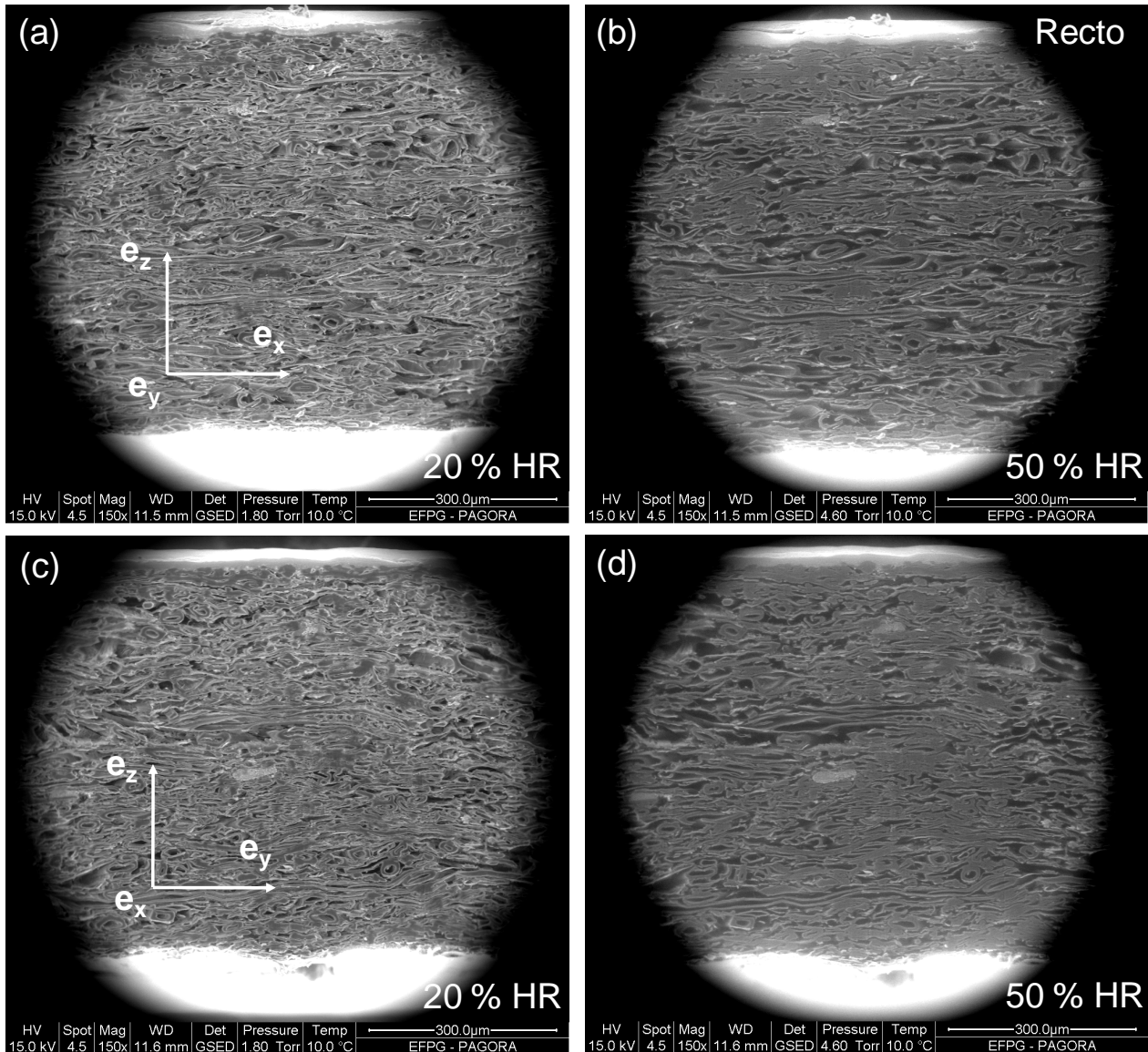


Figure 1 : (a) Coupe dans le plan de l'épaisseur (e_x , e_z) à HR = 20 % d'humidité relative, (b) même coupe après passage à 50 % HR, (c) coupe dans le plan (e_y , e_z) à HR = 20 % et (d) même coupe après passage à HR = 50 % du carton plat vues au MEBE.

Dans le système VARIMASS[®], l'échantillon est pesé régulièrement au cours du temps. L'ordinateur enregistre la variation Δm de masse associée à ces changements d'humidité. La masse sèche m_s de l'échantillon est mesurée après passage à l'étuve de l'échantillon pendant 24 h à 105°C. La teneur mas sique en eau de l'échantillon est définie par le rapport suivant :

$$\frac{\Delta m}{m_s} \quad (\text{eq. 1})$$

Dans l'appareil VARIDIM[®], les variations ΔL de longueur de 10 échantillons rectangulaires d'une longueur initiale $L_0 = 150$ mm et d'une largeur de 15 mm, prélevés selon le sens marche et le sens travers du carton, sont mesurées simultanément. Ces échantillons sont montés à la verticale dans l'appareil et tenus encastres par des pinces magnétiques. A leur extrémité inférieure, les échantillons sont maintenus par des mors magnétiques, légers (< 20 g), montés sur une glissière et reliés à des capteurs de déplacement (type LVDT). L'ordinateur enregistre les variations de longueur associées aux changements d'humidité relative. La précision des mesures est de 2% pour l'humidité relative, de 0,5°C pour la température, de 0,005 mg po ur la masse et de 3 μ m pour la longueur.

La déformation macroscopique ε_h dans le plan est alors calculée :

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (\text{eq. 2})$$

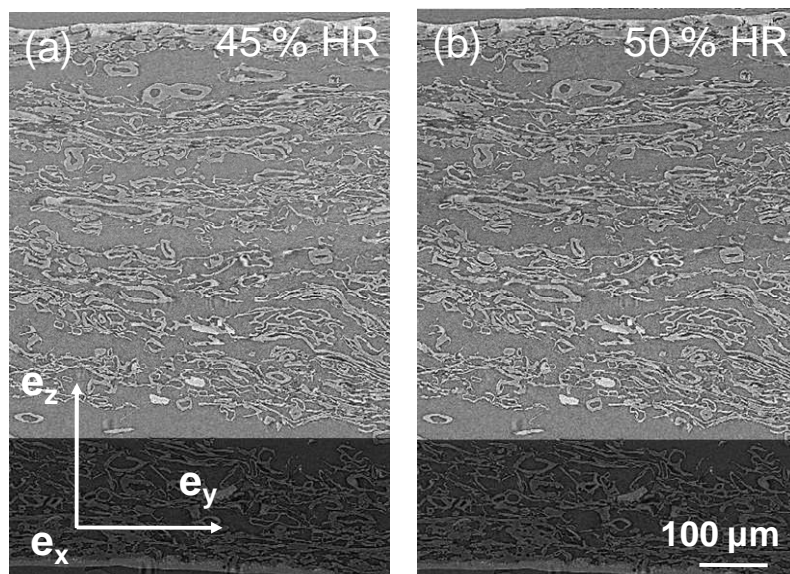


Figure 2 : (a) Coupe dans le plan de l'épaisseur (e_y , e_z) à HR = 20 %, (b) même coupe après passage à HR = 50 % du carton plat extraites d'un volume obtenu par microtomographie aux rayons X (ESRF, ligne ID19).

2.3. Techniques d'imagerie

La structure du carton a été imagée par deux techniques : par microscopie électronique à balayage conditionné en humidité relative et en température (MEBE Quanta 200 FEI) et par microtomographie à rayonnement X avec contrôle *in situ* de l'humidité relative au European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) de Grenoble sur la ligne ID19. Le MEBE donne accès à l'épaisseur du carton et permet une caractérisation partielle de la structure. Il est équipé d'un détecteur à électrons secondaires gazeux. Il peut fonctionner à des pressions allant jusqu'à 50 Torr et à des températures d'échantillon contrôlées par une platine à effet Peltier, ce qui permet l'observation directe d'échantillons hydratés. Le pilotage précis des conditions de température et de pression dans la chambre du microscope permet également de suivre en dynamique des variations d'humidité. La résolution de l'image est de 1024 x 943 pixels, codée en 16 bits. Les coupes de l'échantillon sont préparées pour visualiser les différentes couches du carton plat. Les échantillons ont été découpés en utilisant une lame de rasoir et la face recto du carton a été collée par un adhésif sur le porte échantillon. Les sauts d'humidité relative réalisés sont les suivants : HR = 50-20-50-80 %.

La microtomographie aux rayons X permet d'obtenir une caractérisation complète de la structure interne de manière non-invasive. Pour visualiser correctement les principaux constituants du carton, une taille de pixel de $0,7 \times 0,7 \times 0,7 \mu\text{m}^3$ a été choisie. Au cours de l'acquisition, un faisceau parallèle et monochromatique (20.5 keV) irradie les échantillons. Le faisceau transmis donne des radiographies enregistrées à différents angles (1500). Un algorithme de projection permet *in fine* la reconstruction de la structure 3D. Des échantillons de $1,4 \times 1,4 \times$ épaisseur du carton mm³ ont été imagés. Un générateur d'humidité similaire à celui des systèmes VARIMASS® et VARIDIM® a été utilisé suivant la procédure décrite dans [4]. Pour des raisons expérimentales, les sauts d'humidité relative suivants ont été réalisés : HR = 50-45-50-45-50 %.

2.4. Méthode de corrélation d'images

Les images obtenues par les deux techniques d'imagerie sont traitées par le logiciel de corrélation d'images 7D [5]. La technique de corrélation d'images s'appuie sur l'exploitation de deux images, l'une dite de référence, l'autre correspondant à l'état déformé de la même surface. Le principe de la corrélation d'images est de « reconnaître » un même motif d'une image à l'autre, et de l'utiliser comme un « marqueur » d'un petit domaine de l'image. Pour apparier ces deux motifs et les faire coïncider, il est nécessaire de déplacer ce domaine d'une quantité que l'on identifie alors naturellement au déplacement local. Ici la variation des niveaux de gris entre les pixels crée une grille naturelle de motifs aléatoire. A partir des images issues du MEBE, les déplacements sont mesurés dans les plans de coupe selon l'épaisseur (e_x , e_z) et

$(\underline{e}_y, \underline{e}_z)$, pour deux niveaux d'humidité relative de 20 et 50 %. Les quatre plans de coupe sont présentés sur les Fig. 1a-d. Seul Le plan $(\underline{e}_y, \underline{e}_z)$ a été étudié sur l'échantillon imagé par microtomographie lors du saut d'humidité de HR = 45 à 50 % (Fig. 2a-b). Le champ de déplacement dans le repère $(\underline{e}_x, \underline{e}_y, \underline{e}_z)$ s'exprime :

$$\underline{u}(x, y, z) = u\underline{e}_x + v\underline{e}_y + w\underline{e}_z \quad (\text{eq. 3})$$

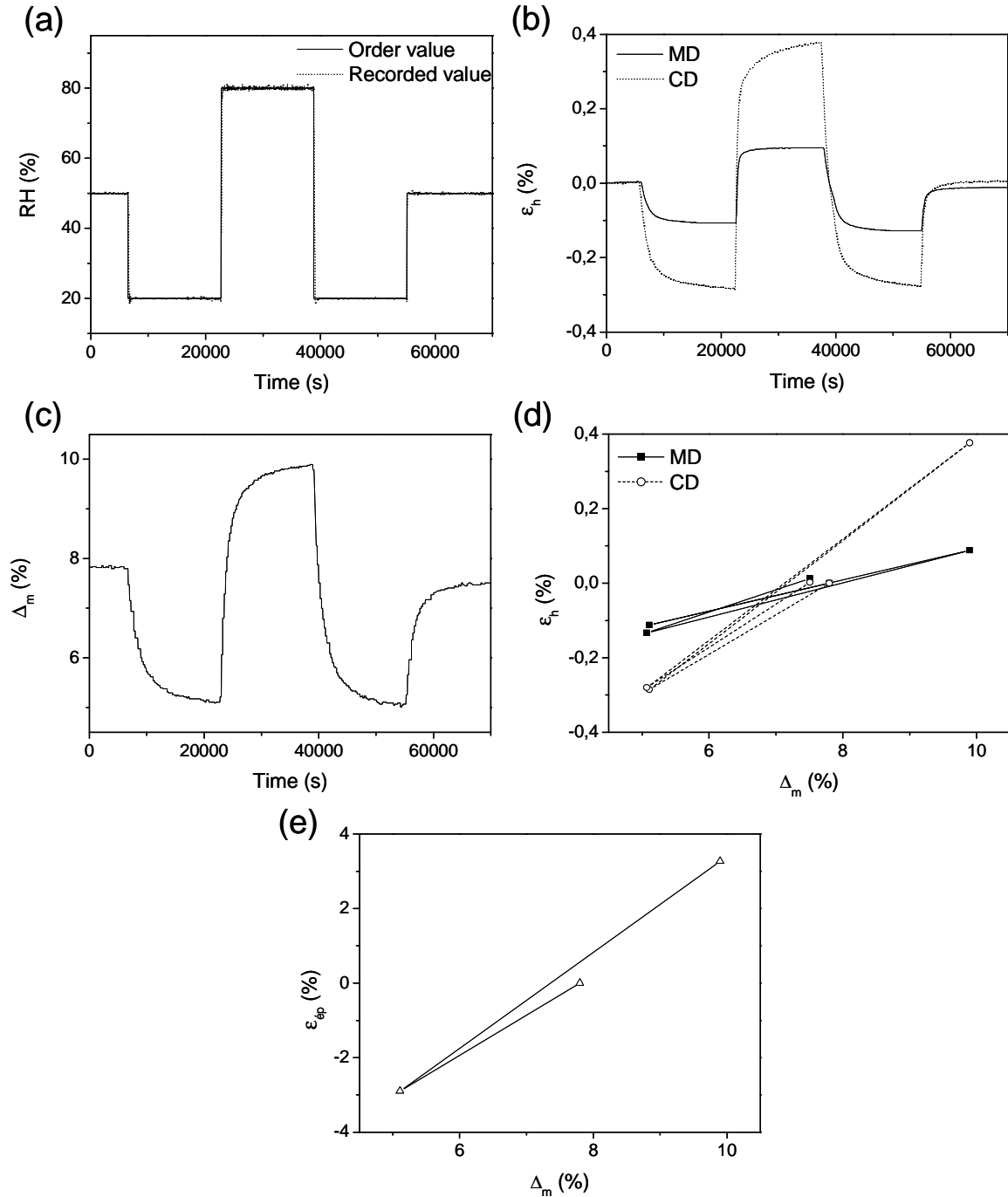


Figure 3 : (a) Evolution de la valeur de consigne et de la valeur enregistrée de l'humidité relative (HR) en fonction du temps, (b) évolution de la teneur en eau, (c) évolution de la déformation hygroscopique ε_h dans le sens marche (SM) et le sens travers (ST) du carton, (d) évolution de la déformation hygroscopique dans le sens marche et le sens travers en fonction de la teneur en eau et (e) évolution de la déformation hygroscopique dans l'épaisseur.

Les composantes du champ sont ensuite lissées par la fonction « Smooth » de Matlab[®]. Finalement, les composantes suivantes du tenseur $\underline{\varepsilon}$ de petites déformations sont calculées :

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} \\
\varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} \\
\varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z}
\end{aligned}
\quad \text{et} \quad
\begin{aligned}
2\varepsilon_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\
2\varepsilon_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}
\end{aligned}
\quad (\text{eq. 4})$$

Remarque : dans la suite, la direction x correspondra au sens marche du carton plat, tandis que la direction y correspondra à son sens travers.

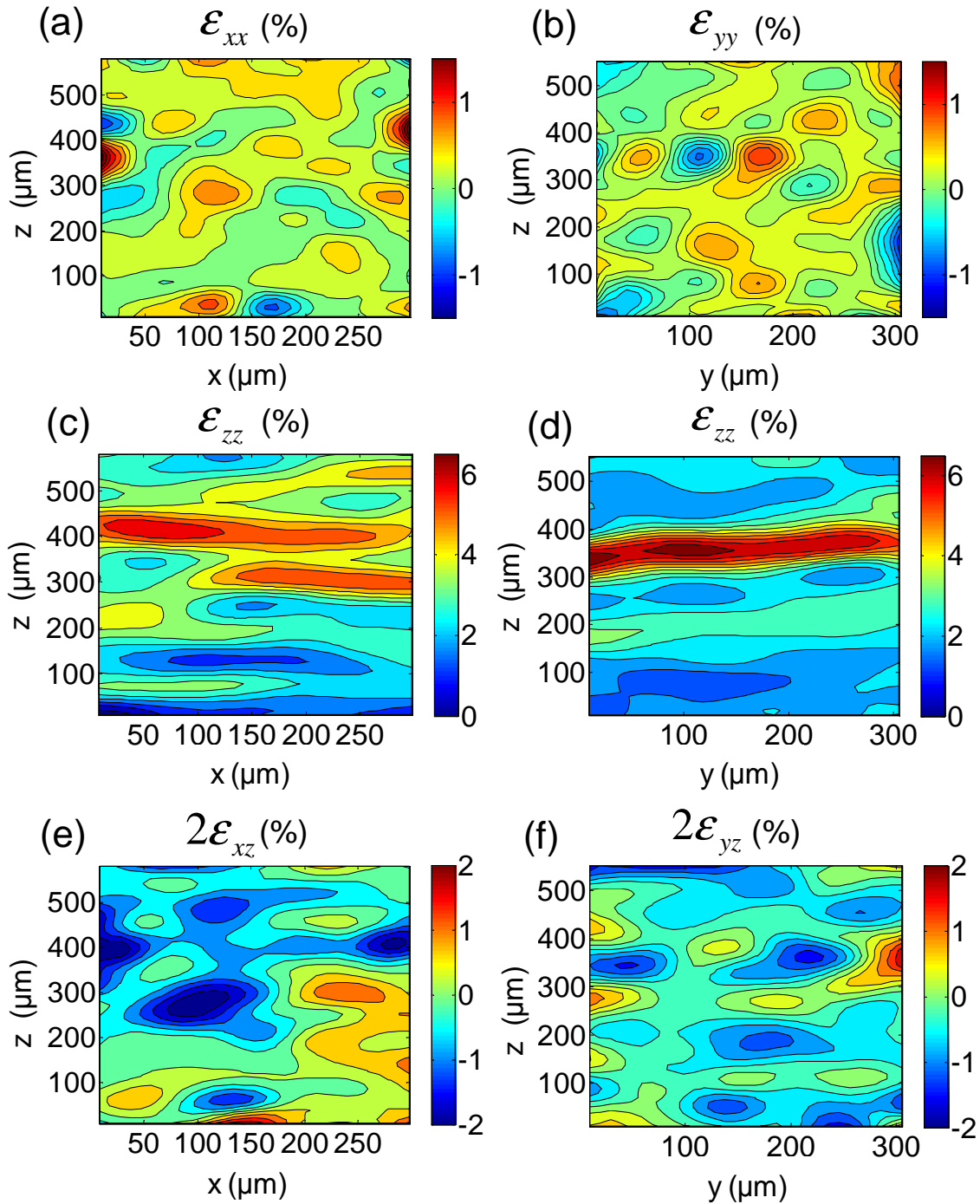


Figure 4 : (a) Carte de la déformation ε_{xx} dans le plan $(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_z)$, (b) carte de la déformation ε_{yy} dans le plan $(\mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$, (c) carte de la déformation ε_{zz} dans le plan $(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_z)$, (d) carte similaire dans le plan $(\mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$, (e) carte la déformation de cisaillement $2\varepsilon_{xz}$ dans le plan $(\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_z)$ et (f) carte similaire pour $2\varepsilon_{yz}$ dans le plan $(\mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$ pour un changement d'humidité de HR = 20 % à 50 %.

3. Résultats

La Fig. 3a montre les sauts d'humidité relative réalisés au cours du temps. Chaque palier a une durée de 14400 s, hormis le premier palier qui lui a une durée de 7200 s uniquement. L'humidité relative mesurée dans l'enceinte suit de manière très proche la valeur de consigne. L'évolution de la teneur en eau du carton est décrite sur la Fig. 3b. La teneur en eau varie entre 5,1 et 9,8 % pour une variation extrême de 20 à 80 % d'humidité relative. On considère la teneur en eau du carton comme étant stabilisée à la fin de chaque palier et avant chaque changement d'humidité. On peut remarquer que les teneurs en eau au premier et au second passage à 20 % HR sont similaires. Ce n'est pas le cas à HR = 50 %, la teneur en eau atteinte au deuxième passage étant en effet 5 % inférieure à la première valeur mesurée. Ceci traduit une modification irréversible de la capacité du carton à absorber l'humidité.

Les déformations hygroscopiques ε_h dans le sens marche (SM) et dans le sens travers (ST) associées à la variation de teneur en eau sont représentées par la Fig. 3c. Notons ici que la longueur initiale de l'échantillon, qui sert de référence aux calculs de déformation, est celle relevée à la fin du premier palier à HR = 50%. L'allure des courbes est sensiblement la même que celle obtenue pour la variation de la teneur en eau. On peut observer que la déformation se stabilise plus rapidement pour les échantillons prélevés sens marche que sens travers. La Fig. 3d montre l'évolution de la déformation à l'équilibre (en fin de palier d'humidité) en fonction de la teneur en eau du carton. A partir de ces courbes, on peut définir un coefficient d'hygroexpansion macroscopique, en considérant le saut d'humidité entre HR = 20 et HR = 80 %, comme suit :

$$\beta_i = \frac{\varepsilon_h}{\Delta_m} \quad (\text{eq. 5})$$

avec $i = SM$ ou ST pour désigner le sens marche ou le sens travers. On constate que le coefficient d'hygroexpansion moyen dans le sens travers $\beta_{ST} = 0,13$ est presque trois fois supérieur à celui mesuré en sens marche $\beta_{SM} = 0,045$. Par ailleurs, les échantillons testés réagissent de manière nettement différente selon s'ils absorbent ou s'assèchent au cours du cycle d'humidité. En sens travers, pour la teneur en eau minimale au cours du premier passage à une HR = 20%, la déformation hygroscopique est de -0,28 % alors qu'elle atteint 0,38 % pour la teneur en eau maximale, correspondant à HR = 80%. En sens marche, les déformations sont respectivement égales à -0,14 % et 0,06 %.

La déformation hygroscopique macroscopique dans l'épaisseur ε_{ep} en fonction de la teneur en eau est représentée sur la Fig. 3e. Elle est fournie en calculant la moyenne des déformations ε_{zz} évaluées par l'analyse des images issues du MEBE. La mesure est donc limitée aux deux premiers sauts d'humidité (cf. Fig. 3a). Pour des variations identiques d'humidité relative, la déformation selon l'épaisseur est bien plus importante que celles mesurées sens marche et sens travers dans le plan du carton : la déformation atteinte au maximum de teneur en eau est de 3,25 % et le coefficient d'hygroexpansion selon l'épaisseur $\beta_{ep} = 1,3$.

Les Fig. 4a-f montrent les cartes des composantes du champ de déformation dans les plans de l'épaisseur du carton ($\underline{e}_x, \underline{e}_z$) et ($\underline{e}_y, \underline{e}_z$) pour un saut d'humidité relative 20 à 50 %, évaluées à partir des images issues du MEBE et de la méthode de corrélation d'images. La moyenne des déformations ε_{xx} et ε_{yy} mesurées grâce à cette méthode sont respectivement égales à 0,198 % et 0,241 %, c'est-à-dire très proches de celles estimées au moyen de la mesure macroscopique de l'appareil VARIDIM®.

Le grand attrait de cette technique est de révéler les très fortes hétérogénéités des composantes du champ de déformation.

Toutefois, il est difficile d'établir un lien entre les hétérogénéités des composantes du champ de déformation et la structure stratifiée du carton plat. Il apparaît des zones, où les valeurs des composantes ε_{xx} , ε_{yy} sont négatives, qui sont juxtaposées à des zones où les valeurs de ces mêmes composantes sont positives. Il semble que ce phénomène puisse être relié à l'accroissement ou l'apparition de pores dans la structure (cf. Fig. 1a-d). Les hétérogénéités des composantes ε_{xz} et ε_{yz} restent plus difficiles à interpréter.

La déformation ε_{zz} varie de 0 à plus de 6% et semble s'organiser en strates. Certaines couches, qui s'avèrent développer une très grande porosité, sont celles qui présentent les plus grandes valeurs pour cette composante du champ de déformation (cf. Fig. 1a-d).

Les Fig. 5a-c montrent les cartes des composantes du champ de déformation dans le plan ($\underline{e}_y, \underline{e}_z$) évaluées à partir de coupes d'échantillons imagés par microtomographie aux rayons X au cours d'une légère modification de l'humidité relative de 45 à 50 %. Le comportement est similaire à celui observé précédemment même pour ce changement faible d'humidité. Ceci montre la faisabilité d'une étude du comportement hygroexpansif du carton plat en se basant sur des volumes issus de la microtomographie.

La différence très importante de l'hygroexpansion du carton plat selon son plan et son épaisseur peut sans doute être reliée au comportement hygroexpansif particulier des fibres de bois et à leur orientation

majoritaire dans le plan des couches : l'hygroexpansion longitudinale des fibres est en effet de l'ordre de 1%, tandis qu'elle est de l'ordre de 20 % radialement [6].

Il n'est pas possible en l'état actuel de l'étude de distinguer la contribution respective des pores et de la phase fibreuse à ces phénomènes d'hygroexpansion. Cette analyse sera réalisée ultérieurement de manière plus approfondie sur des images issues des expériences de microtomographie grâce à des outils d'analyse spécifiques [4].

Certaines couches intérieures du carton plat se déforment de manière très importante ($\epsilon_{zz} \approx 6\%$) alors que ses couches extérieures se déforment peu ($\epsilon_{zz} \approx 1$ à 2%). Les couches intérieures sont majoritairement constituées de pâte mécanique alors que les couches extérieures sont constituées de pâte chimique. Les différentes couches intérieures n'ont pas toutes le même comportement alors qu'elles comportent des fibres et des éléments fins issues de la même pâte mécanique. Ces différences peuvent peut-être s'expliquer par la présence de rebus de production dans des proportions plus ou moins importantes suivant les couches. En général, des fibres issues d'une pâte mécanique, comporte une teneur importante en lignine qui devrait limiter leur sensibilité à l'humidité. Cet effet peut cependant être contrarié par une présence importante d'éléments fins. Ces différents points doivent encore être approfondis.

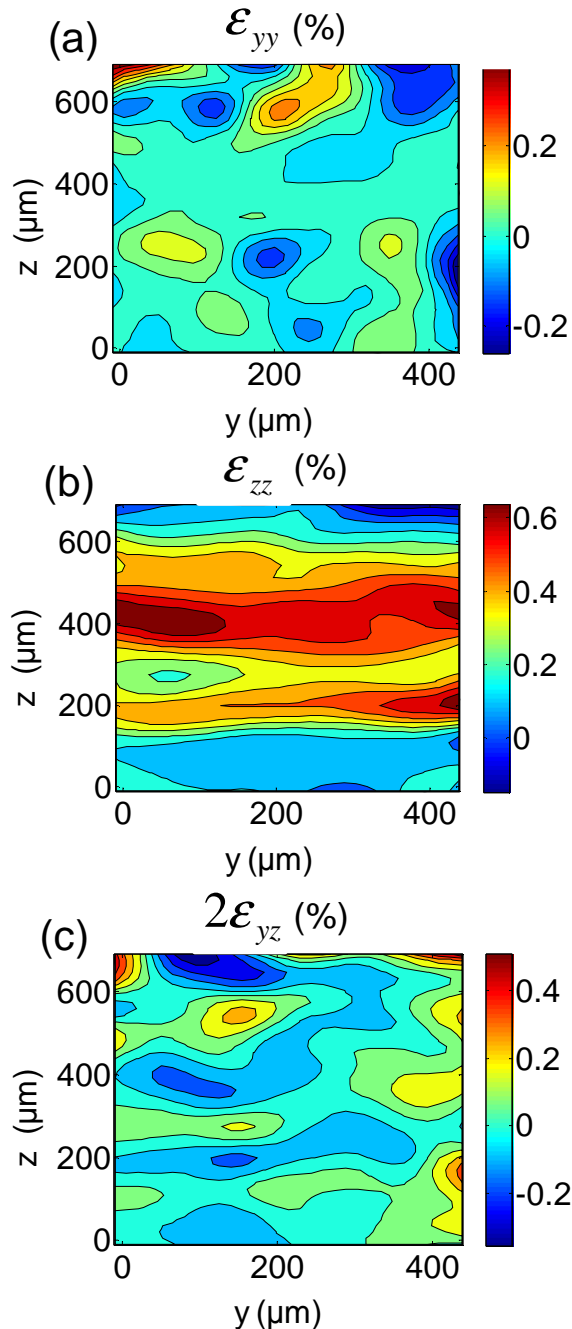


Figure 5 : (a) Carte de la déformation ϵ_{yy} , (b) carte de la déformation ϵ_{zz} et (c) carte de la déformation de cisaillement $2\epsilon_{yz}$ dans le plan (\underline{e}_y , \underline{e}_z).

Conclusion

L'hygroexpansion du carton plat a été étudiée à l'échelle macroscopique à l'aide de méthodes classiques. La déformation hygroscopique est fortement anisotrope. Elle est beaucoup plus importante selon l'épaisseur du carton que selon ses directions sens marche et sens travers. A l'échelle de la microstructure fibreuse, les composantes du champ de déformation ont été déterminées par une méthode de corrélation d'images issues de MEBE et de volumes de microtomographie pour déterminer le champ de déformation selon des tranches prises dans l'épaisseur du carton. Le champ de déformation est très hétérogène et ses variations avec l'humidité relative s'accompagnent d'une évolution de la porosité du matériau. La variabilité du comportement est importante entre les couches intérieures et extérieures. Elle peut sans doute être reliée à la nature et à la composition des pâtes qui constituent les différentes couches.

Références

- [1] L. Salmén et C. Fellers. The nature of volume hydroexpansivity of paper. *J Pulp Paper Sci.*, Vol 15(2) pp.63-65, 1989.
- [2] C. Fellers L. Salmén, R. Boman et M. Htun. The implications of fiber and sheet structure for the hygroexpansivity of paper [curl, shrinkage, beating, fines]. *Nordic Pulp Paper Res.*, Vol 2(4), pp.127-131, 1987.
- [3] J.O. Lif, C. Fellers, C. Söremark et M. Sjö Dahl. Characterizing the in-plane hygroexpansivity of paper by electronic speckle photography. *J Pulp Paper Sci.*, Vol 21(9), pp.302-309, 1995.
- [4] S. Rolland du Roscoat. Contribution à la quantification 3D de réseaux fibreux par microtomographie au rayon synchrotron: applications aux papiers. *Thèse de l'Institut polytechnique de Grenoble (Grenoble INP)*, 2007.
- [5] P. Vacher, S. Dumoulin, F. Morestin, S. Mguil-Touchal, « Bidimensional Strain Measurement using Digital Images ». *Instn Mech Engrs Part C ImechE*, Vol 213, pp.811-817, 1999.
- [6] W. Gallay, "Stability of dimensions and forms of paper", *Tappi*, Vol. 56(12), pp. 90-93, 1973.